

doi: 10.12029/gc20210802002

郭惠, 赵红格, 陈江萌, 邵晓州, 刘池洋, 王建强, 雷琳琳, 李俊, 汪建, 黄雷. 2024. 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延长组裂缝特征及其对低渗透油藏的控制作用[J]. 中国地质, 51(1): 73–88.

Guo Hui, Zhao Hongge, Chen Jiangmeng, Shao Xiaozhou, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Lei Linlin, Li Jun, Wang Jian, Huang Lei. 2024. Fracture characteristics of Triassic Yanchang Formation in the Gufengzhuang Area, Western Ordos Basin and its control on low permeability reservoirs[J]. Geology in China, 51(1): 73–88(in Chinese with English abstract).

# 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延长组裂缝特征及其对低渗透油藏的控制作用

郭惠<sup>1,2</sup>, 赵红格<sup>1</sup>, 陈江萌<sup>3</sup>, 邵晓州<sup>4,5</sup>, 刘池洋<sup>1</sup>,  
王建强<sup>1</sup>, 雷琳琳<sup>6</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 汪建<sup>1</sup>, 黄雷<sup>1</sup>

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 陕煤集团神木红柳林矿业有限公司, 陕西 神木 719300; 3. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂地质研究所, 陕西 西安, 710200; 4. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 5. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710021; 6. 中国石油集团测井有限公司地质研究院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**【研究目的】鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延长组属于低渗透储层, 天然裂缝较为发育, 以往对裂缝特征研究较少, 开展天然裂缝特征和形成时期研究对低渗透油藏勘探开发具有重要作用。【研究方法】文章通过野外露头、钻井岩心、成像测井、扫描电镜裂缝识别和流体包裹体、断裂活动、构造应力分析等方法展开了古峰庄地区延长组天然裂缝特征和控藏作用研究。【研究结果】延长组各段天然裂缝均发育, 以长 7 段最为发育, 其次为长 8、长 6 段; 裂缝以高角度裂缝和垂直裂缝为主, 走向以 NEE 向为主, NE 向次之, 少量 NW 和 NWW 向; 裂缝面可见方解石充填和明显过油痕迹。天然裂缝发育程度与岩层厚度、断裂活动密切相关。裂缝形成时期具有多期性, 主要为燕山期和喜马拉雅期。【结论】延长组天然裂缝的发育改善了研究区低渗透储层的孔渗能力和储集空间, 为低渗透油藏运移、储集和富集提供了良好条件, 其发育程度与形成时期影响着低渗透油藏的成藏和产能。

**关键词:** 延长组; 裂缝特征; 形成期次; 低渗透油藏; 古峰庄地区; 油气地质; 油气勘查工程; 鄂尔多斯盆地

**创新点:** (1) 古峰庄地区三叠系延长组宏观—微观裂缝平、剖面特征和发育程度具有差异性; (2) 裂缝形成具有多期性, 不同时期裂缝成因机制不同。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0073-16

## Fracture characteristics of Triassic Yanchang Formation in the Gufengzhuang Area, Western Ordos Basin and its control on low permeability reservoirs

GUO Hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongge<sup>1</sup>, CHEN Jiangmeng<sup>3</sup>, SHAO Xiaozhou<sup>4,5</sup>, LIU Chiyang<sup>1</sup>,  
WANG Jianqiang<sup>1</sup>, LEI Linlin<sup>6</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>1</sup>

收稿日期: 2021-08-02; 改回日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072170, 41972153, 42230815), 大陆动力学国家重点实验室团队项目(201210132), 陕西省高校青年创新团队(盆地演化与能源矿产)项目及中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院项目(ZY19-XA412-FW1216)联合资助。

作者简介: 郭惠, 男, 1996 年生, 硕士, 地质资源与地质工程专业; E-mail: hg9068@qq.com。

通讯作者: 赵红格, 女, 1975 年生, 博士, 教授, 从事沉积盆地分析与油气地质研究; E-mail: zhaohg@nwu.edu.cn。

(1. Department of Geology, Northwestern University, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Coal Group Shenmu Hongliulin Mining Co., Ltd., Shenmu 719300, Shaanxi, China; 3. Geological Research Institute of the Second Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710200, Shaanxi, China; 4. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 5. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 6. Geology Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil-gas exploration engineering.

**[Objective]** The Triassic Yanchang Formation in the Gufengzhuang area of the western Ordos Basin develops low-permeability reservoir with abundant natural fractures, and few investigations have focused on the features of the fractures that are of great significance for the exploration and development of low-permeability reservoirs. **[Methods]** In this paper, by means of fracture identification from the outcrops, cores, imaging logging, scanning electron microscope and fluid inclusion, fault activity and tectonic stress analysis, the fracture characteristics and influence on low permeability reservoirs are studied. **[Results]** The results show that natural fractures are all developed in each Member of the Yanchang Formation, with Chang 7 being the most developed Member, followed by Chang 8 and Chang 6 Members. The fracture mainly orients in the NEE direction, secondly in the NE direction, and lastly in the NW and NWW directions. Calcite filling and obvious oil migration marks can be seen on the surfaces of the cracks. The development degree of natural fractures is closely related to the thickness of rock layers and intensity of fault activity. Comprehensive analysis of the fluid inclusions in fractures, faults and tectonic activities shows that the formation period of fractures is multi-stage, mainly in the Yanshanian and Himalayan periods. **[Conclusions]** The development of natural fractures has improved the porosity and permeability and reservoir space of low-permeability reservoirs in the study area, and provided favorable conditions for oil migration, accumulation and enrichment in low-permeability reservoirs. The development degree and formation period of natural fractures affect the reservoir forming and productivity of low-permeability reservoirs.

**Key words:** Yanchang Formation; fracture characteristics; formation stages; low-permeability reservoir; Gufengzhuang area; petroleum geology; oil-gas exploration engineering; Ordos Basin

**Highlights:** (1)The plane and profile characteristics and development degrees of macro-micro fractures in the Yanchang Formation of Triassic in the Gufengzhuang area are different; (2)The formation stages of fractures vary with different genetic mechanism.

**About the first author:** GUO Hui, male, born in 1996, master, majors in geological resources and geological engineering; E-mail: hg9068@qq.com.

**About the corresponding author:** ZHAO Hongge, female, born in 1975, doctor, professor, engaged in sedimentary basin analysis and oil and gas geological research; E-mail: zhaohg@nwu.edu.cn.

**Fund support:** Support by the projects of National Natural Science Foundation of China (No.42072170, No.41972153, No.42230815), State Key Laboratory of Continental Dynamics (No.201210132), Youth Innovation Term of Shaanxi University (Basin Evolution and Energy Minerals), Exploration and Development Research Institute Project of Changqing Oilfield Company of China National Petroleum Corporation (No.ZY19-XA412-FW1216).

## 1 引 言

鄂尔多斯盆地三叠系延长组天然裂缝对低渗透油藏成藏意义重大,一直是油藏勘探开发关注的重点(邓秀芹等, 2011; 赵靖舟等, 2012; 杨伟伟等, 2013; 白玉彬等, 2013; 赵向原等, 2016; 吴伟涛等, 2016; 屈雪峰等, 2017; Bai et al., 2021)。目前已探明鄂尔多斯盆地中生界石油储量达 49.59 亿 t, 地质

总资源量达 146.50 亿 t(惠潇等, 2019)。前人通过野外露头、岩心、成像测井以及测试分析等多种研究手段对盆地姬塬、镇泾和麻黄山等地区延长组裂缝的特征、成因、影响因素及油气关系做了大量研究, 并指出裂缝是石油运移的重要通道, 对石油的富集和开发具有作用(张莉, 2003; 罗桂滨, 2008; 梁晓伟等, 2009; 邓虎成等, 2010; 王启宇等, 2011; 王翠丽等, 2014; 刘行军等, 2014; 肖承钰等, 2015; 樊

建明等, 2016; 罗斌等, 2017; Dang et al., 2018; 鞠玮等, 2020)。目前, 延长组长 6 至长 8 油层段作为盆地低渗透油藏的主力层位, 获得越来越多的关注。新安边、姬塬、陇东、安塞等地区已展开裂缝对低渗透油藏的储集空间、运移通道、富集、开发方案及压裂改造等研究(邓虎成等, 2009; 杨伟伟等, 2013; 白玉彬等, 2013; 付金华等, 2013; 吴伟涛等, 2016; 耳闯等, 2016; 赵向原等, 2016; 杨华等, 2017; 屈雪峰等, 2018)。综合前人研究和勘探开发实践表明, 裂缝发育特征、产状以及展布特征对延长组低渗透油藏成藏和开发具有显著作用。

古峰庄地区位于鄂尔多斯盆地天环坳陷中部,

地质条件相对陕北斜坡复杂, 油气勘探开发及研究程度整体比较低(图 1)。近年来, 随着盆地西部油气勘探的不断深入, 延长组各油层段均已获得工业油流, 已成为长庆油田增储上产的重要接替区之一(吴德明等, 2018)。钻井、测井资料揭示古峰庄地区延长组天然裂缝较为发育, 而前人对该地区裂缝重视程度不够, 对其分布规律认识不清。笔者通过邻区野外露头、钻井岩心观察、成像测井、扫描电镜及流体包裹体分析等多种方法和手段对该区天然裂缝的特征、期次及成因展开研究(图 1), 明确裂缝分布规律, 为低渗透油藏勘探开发提供一定参考。

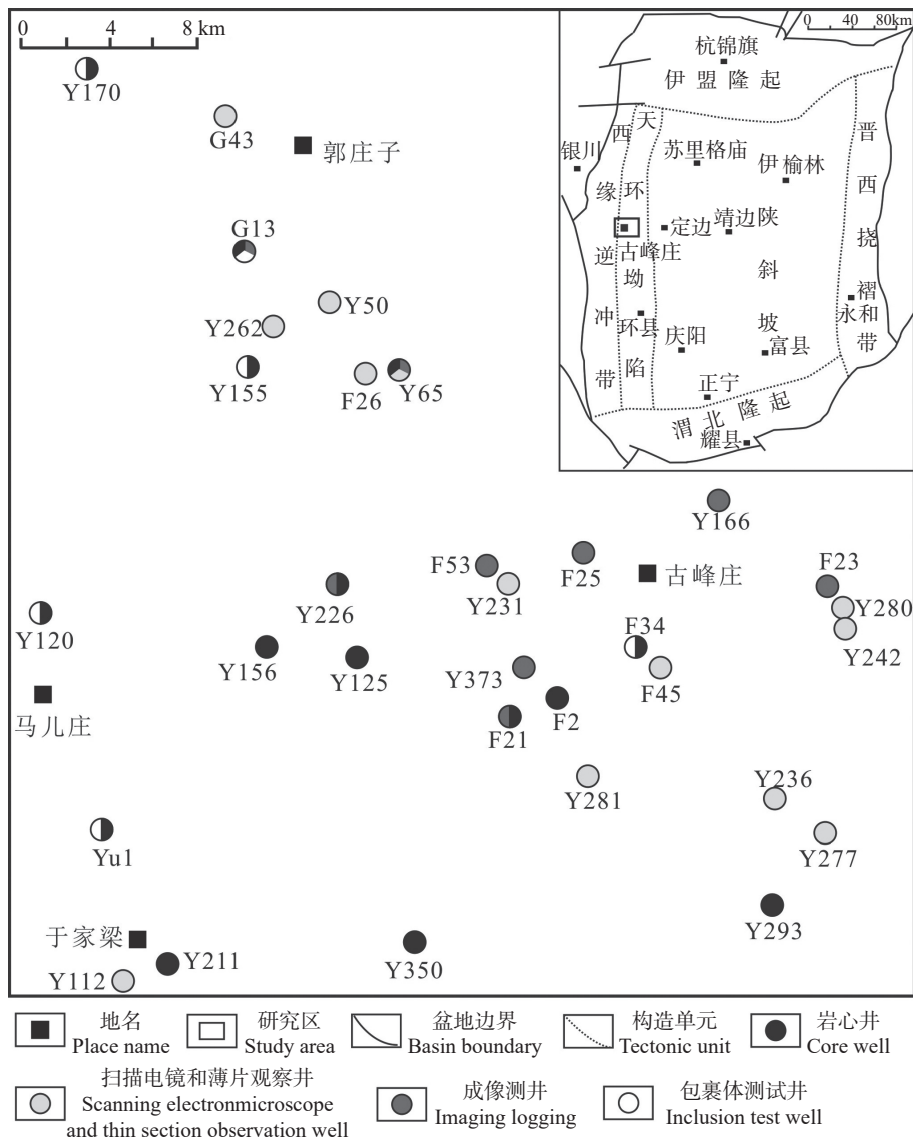


图 1 研究区位置及裂缝相关钻井井位分布图  
Fig.1 Location of the study area and distribution of fracture-related drilling wells

## 2 裂缝发育特征

裂缝按照地质成因可分为构造裂缝和非构造裂缝,构造裂缝对油气成藏以及储层性能影响最大,是本次的研究重点,构造裂缝根据应力不同又可分为剪裂缝和张裂缝;非构造裂缝分为成岩裂缝、收缩裂缝、表面相关缝,对油气成藏以及储层性能改造远不如构造裂缝(张林炎等, 2006; 曾联波等, 2007; 周新桂等, 2009)。

本文以古峰庄地区延长组 15 口岩心观察井、21 口成像测井资料、13 口扫描电镜和薄片观察井,对天然构造裂缝发育特征、时空分布、影响因素和形成期次展开研究。

### 2.1 裂缝宏观-微观特征

#### 2.1.1 野外露头裂缝特征

通过对邵家圈—石沟驿—谢家西沟 3 个地区

的三叠系延长组野外露头裂缝(节理)观测,裂缝主要在细砂岩、粉砂质泥岩中发育,且岩层厚度越薄裂缝越发育。根据所测量裂缝产状绘制裂缝玫瑰花图(图 2a),裂缝整体走向以 NE—NEE 向为主,部分 NW、NWW 向,以高角度—垂直裂缝发育为主;裂缝走向从石沟驿到谢家西沟由 NEE 向逐渐向 NE 向偏移。可见裂缝充填方解石脉体,裂缝具有密度大、成组、高角度以及多方向、相交的特征,表明构造应力活动强烈(图 2b、c)。

#### 2.1.2 岩心裂缝特征

通过 15 口钻井岩心观察(图 3a~d),裂缝主要在细砂岩、泥质粉砂岩中发育,以垂直裂缝和高角度裂缝为主,缝宽 0.05~0.5 cm,倾角多为 70°~90°。裂缝纵向延伸长短不一,最短为 10 cm,最长可达 1.3 m;裂缝部分充填方解石脉体,脉体宽度可达 0.5 cm,长度可达 1.1 m;裂缝类型以剪切裂缝为主,成组出现,雁列状分布,延伸较远,裂缝面平直光滑;

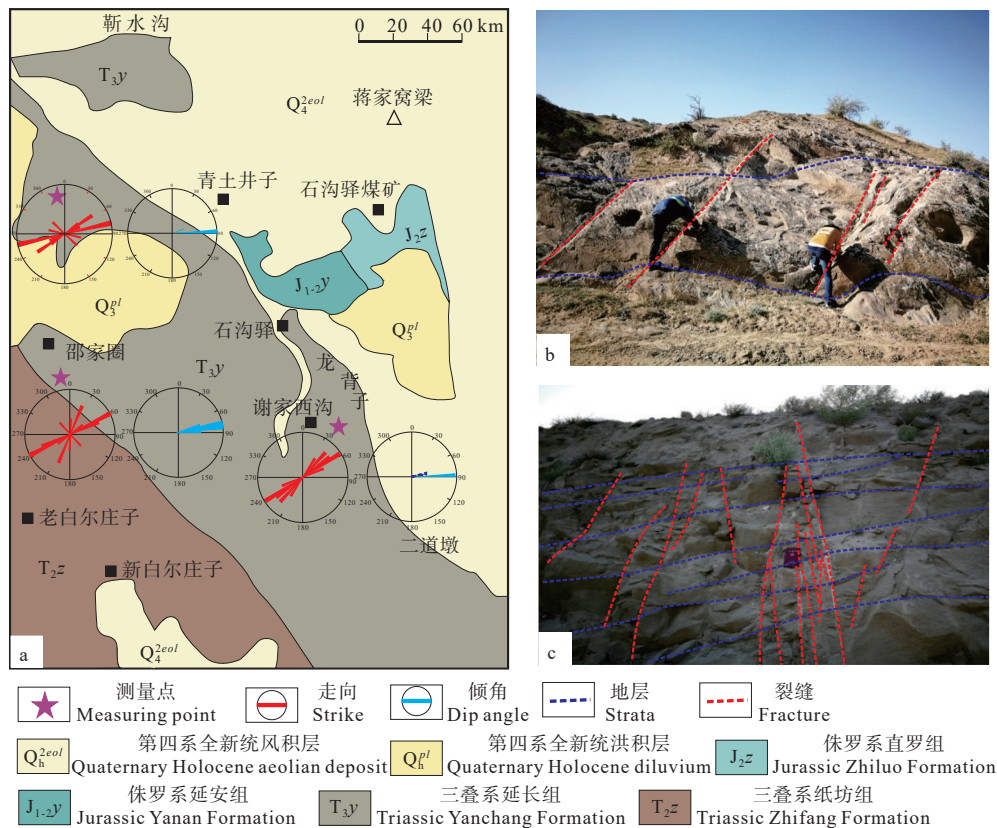


图 2 研究区西邻石沟驿地区野外露头裂缝特征

a—野外裂缝走向、倾角展布图; b—邵家圈裂缝成组发育; c—石沟驿垂直裂缝及其充填的方解石脉体

Fig.2 Characteristics of outcrop fractures in the Shigouyi area adjacent to the west of the study area

a—Field distribution of fracture strike and dip angle; b—Parallel fractures in Shaojiaquan; c—Vertical fractures and the filling calcite vein in the Shigouyi area

部分张性裂缝, 弯曲、规模小、延伸不远, 裂缝面粗糙不平。可见多条不规则裂缝相互穿插和少量构造擦痕, 表明裂缝具有多期性。裂缝充填程度主要为未充填和半充填, 占裂缝总数的 71% 以上, 裂缝有效性较高, 沥青、泥质充填较少(图 4a); 裂缝面和

部分脉体中可见油斑、油迹及油侵等明显过油痕迹, 占 63%(图 4b), 表明裂缝是石油重要的运移通道。

### 2.1.3 微观裂缝特征

通过研究区延长组镜下观察(图 3e~g), 岩性比较致密, 主要为细砂岩和泥质粉砂岩; 微裂缝发育,

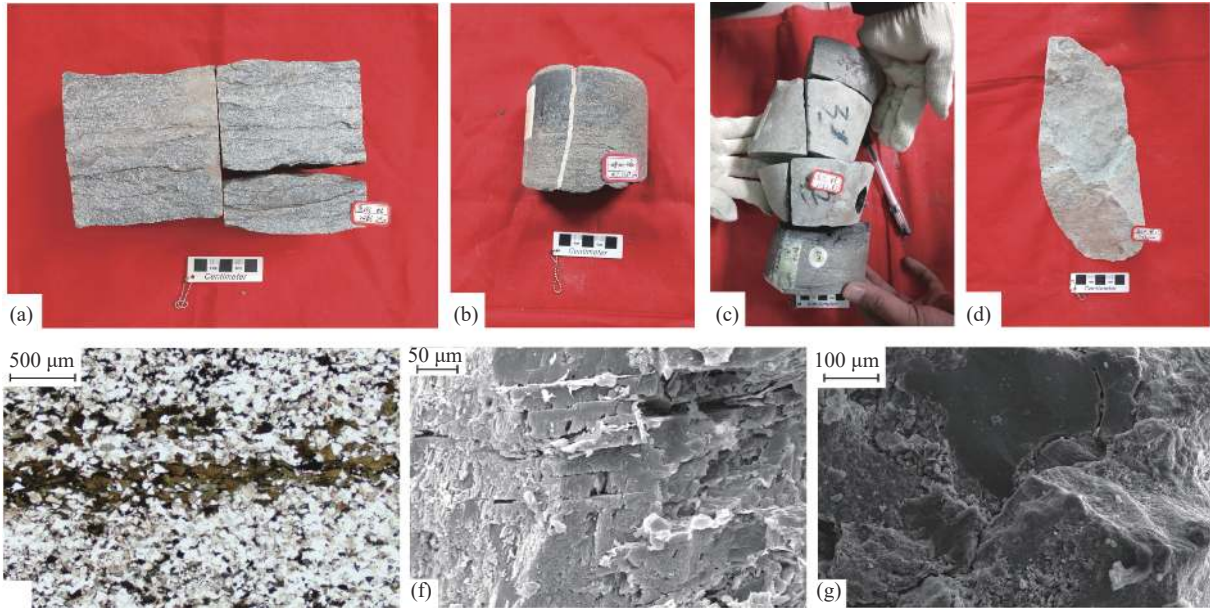


图 3 古峰庄地区延长组钻井岩心裂缝特征

a—F2 井, 长 4+5, 细砂岩, 裂缝内充填沥青质, 油迹; b—Y293 井, 长 6, 泥质粉砂岩, 垂直裂缝, 明显油气运移痕迹; c—F34 井, 长 7, 细砂岩, 高角度裂缝, 方解石脉体充填, 油斑; d—G13 井, 长 8, 细砂岩, 垂直裂缝, 方解石脉体半充填, 明显油气运移痕迹; e—Y120 井, 长 9, 细砂岩, 两条不同方向高角度裂缝, 可见泥质充填, 油迹; f—G43 井, 长 7, 泥质粉砂岩, 顺黑云母夹层裂缝; g—F34 井, 长 9, 细砂岩, 弯曲状构造裂缝

Fig.3 Characteristics of drilling core fractures of the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area  
a—Well F2, Chang 4+5, fine sandstone, asphaltene and oil stains in the fractures; b—Well Y293, Chang 6, muddy siltstone, vertical fractures, obvious traces of oil and gas migration; c—Well F34, Chang 7, fine sandstone, high-angle fracture, calcite vein filling, oil spot; d—Well G13, Chang 8, fine sandstone, vertical fracture, calcite vein half filled, obvious oil and gas migration trace; e—Well Y120, Chang 9, fine sandstone, two high-angle fractures in different directions, mud filling and oil traces; f—Well G43, Chang 7, muddy siltstone, biotite interlayer fractures; g— Well F34, Chang 9, fine sandstone, curved structural fracture

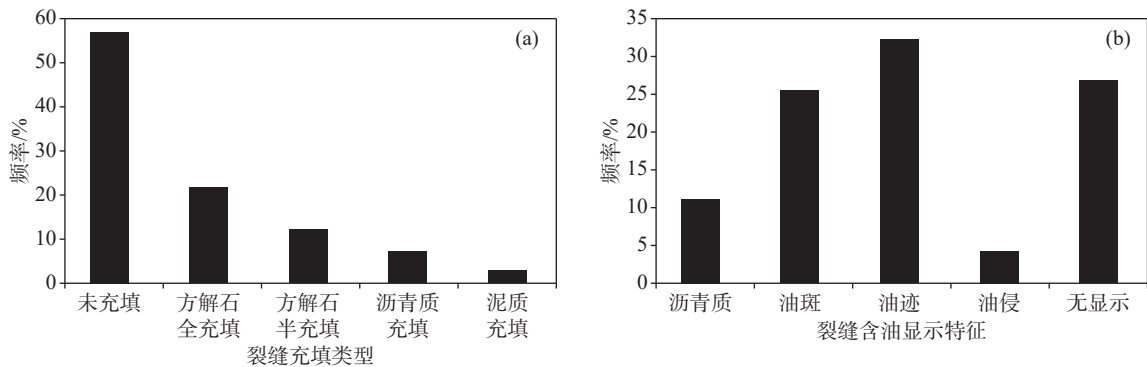


图 4 研究区裂缝特征

a—裂缝充填类型; b—裂缝含油显示特征

Fig.4 Fracture characteristics of the study area

a—Fracture filling type; b—Oil-bearing fracture display characteristics

可分为发育在层状有机质、矿物颗粒内的粒内裂缝和在构造应力场作用下发育构造裂缝。微裂缝开度最大为  $31.92\ \mu\text{m}$ ，最小为  $1.138\ \mu\text{m}$ ，以未充填—半充填为主，有效性高，对改善储层物性和油气富集具有重要作用。但裂缝面和颗粒缝隙之间有少量绿泥石膜和自生矿物及黏土矿物充填，降低了砂岩储层的孔隙度和渗透率，使储层物性变差。

## 2.2 裂缝分布特征

### 2.2.1 成像测井裂缝表征

通过研究区 21 口钻井延长组长 10~长 2 段成

像测井资料裂缝识别，筛选出 2665 条天然裂缝（图 5，图 6）。研究区天然裂缝产状、充填性等特征在成像测井图像得到清晰的呈现（图 5）。闭合裂缝（充填裂缝）图像上呈亮色高阻正（余）弦曲线，如 G13 井长 6 段 NE 向亮色高阻闭合高角度裂缝（图 5a）；开启裂缝（未充填和半充填裂缝）图像上呈暗色高导正（余）弦曲线，如 F34 井长 7 段 NEE 向暗色高导开启高角度裂缝（图 5b），F21 井长 8、长 9 段 NEE 向暗色高导开启垂直裂缝（图 5c、d）。成像测井裂缝统计分析表明天然裂缝以开启裂缝为

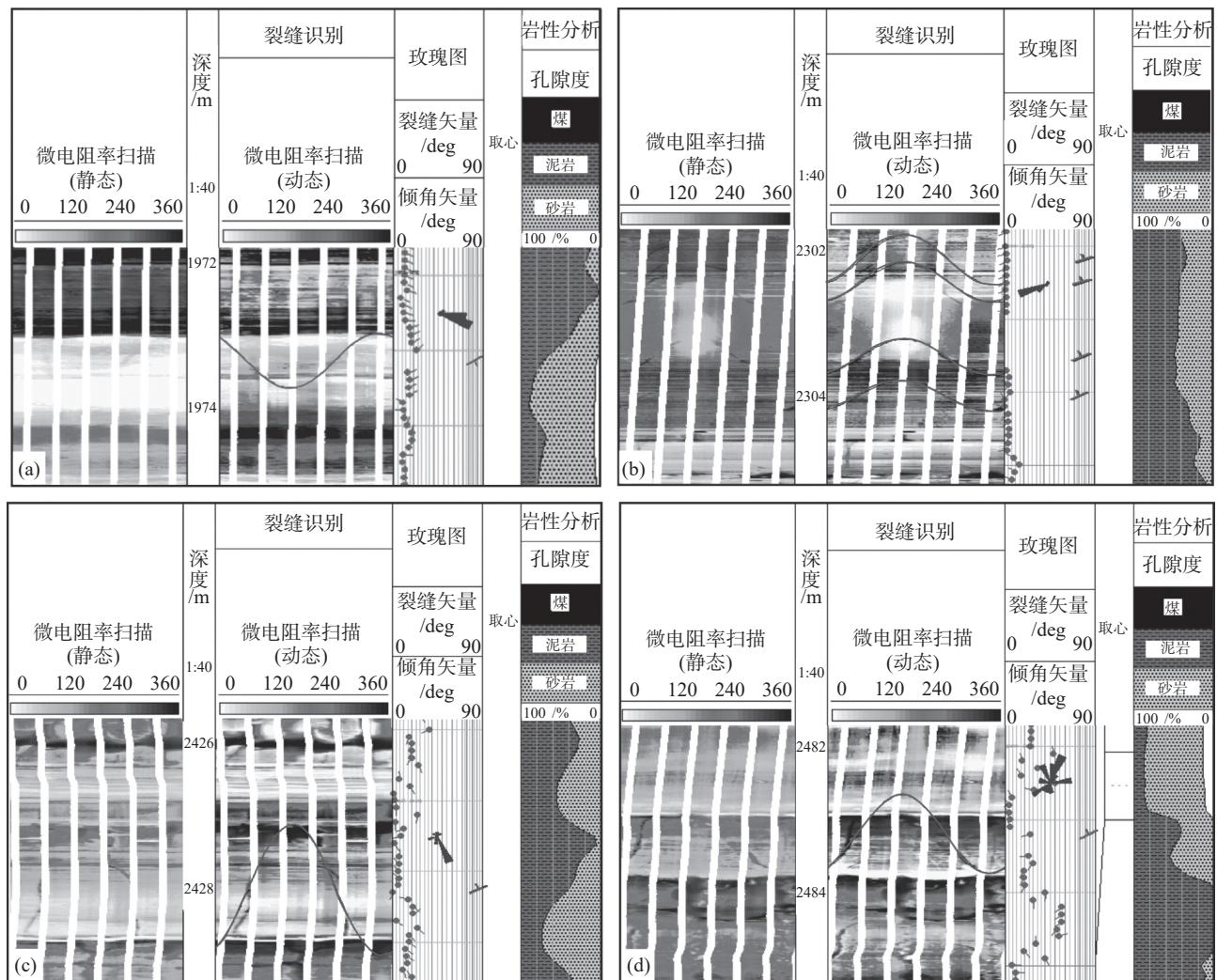


图 5 古峰庄地区延长组天然裂缝成像测井特征图

a—G13 井，长 6，NE 向闭合高角度裂缝；b—F34 井，长 7，NEE 向开启高角度裂缝；c—F21 井，长 8 段，NEE 向开启垂直裂缝；d—F21 井，长 9 段，NEE 向开启垂直裂缝

Fig.5 Characteristics of natural fracture imaging logging in the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area  
a—Well G13, NE-trending closed high-angle fractures in the Chang 6 member; b—Well F34, NEE-trending open high-angle fractures in the Chang 7 member; c—Well F21, NEE-trending open vertical fractures in the Chang 6 member; d—Well F21, NEE-trending open vertical fractures in the Chang 9 member

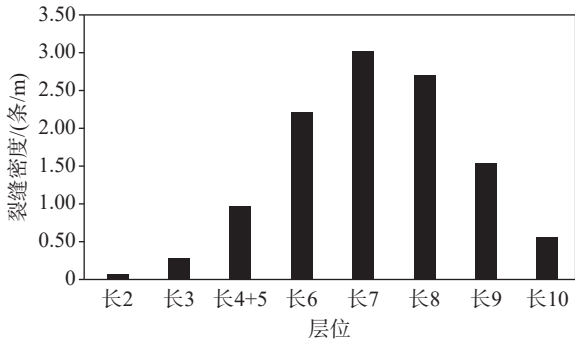


图 6 古峰庄地区延长组各油层组天然裂缝密度图  
Fig.6 Natural fracture density in each oil members of the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area

主, 占 80% 以上。各油层段天然裂缝发育密度不同, 以长 7 最发育, 为 0.329 条/m, 长 6、长 8 段次之, 分别为 0.323 条/m、0.288 条/m, 长 2 裂缝密度最小(图 6)。

### 2.2.2 裂缝纵向分布特征

长 10~长 2 各层天然裂缝平均走向为 65.1°~

80.3°, 走向基本接近, 主体为 NEE、NE 向, 少量为 EW 向和 NW 向(图 7)。自下向上不同段裂缝走向分布稍有差异, 长 10 段 NEE 向为优势方向, 其次为 NE 向裂缝, 长 9 段除了 NEE 优势方向之外, 还发育 EW 和 NE 向裂缝, 长 8~长 6 段 NEE—NE 向优势裂缝分布特征相似, 长 7 段分布更偏 NEE 向, 长 4+5 段方向较分散, 长 3 段走向较集中。由深部长 10 向浅部长 2 裂缝走向具有轻微先向南(长 10~长 9)再向北(长 4+5~长 2)偏移的特征(图 7)。

根据王允诚(1992)裂缝倾角分类: 水平裂缝(0°~15°), 低角度裂缝(15°~45°), 高角度裂缝(45°~75°), 垂直裂缝(75°~90°)对研究区长 10~长 2 各层裂缝分类, 绘制裂缝倾角直方图, 倾角峰值有一定差异, 整体主要有 60°~75°和 75°~90°两个峰值, 表明以高角度裂缝和垂直裂缝为主, 低角度裂缝和水平裂缝较少(图 7)。长 9、长 7、长 2 倾角分布相似, 主峰为 60°~75°, 以高角度裂缝为主, 长 10、长

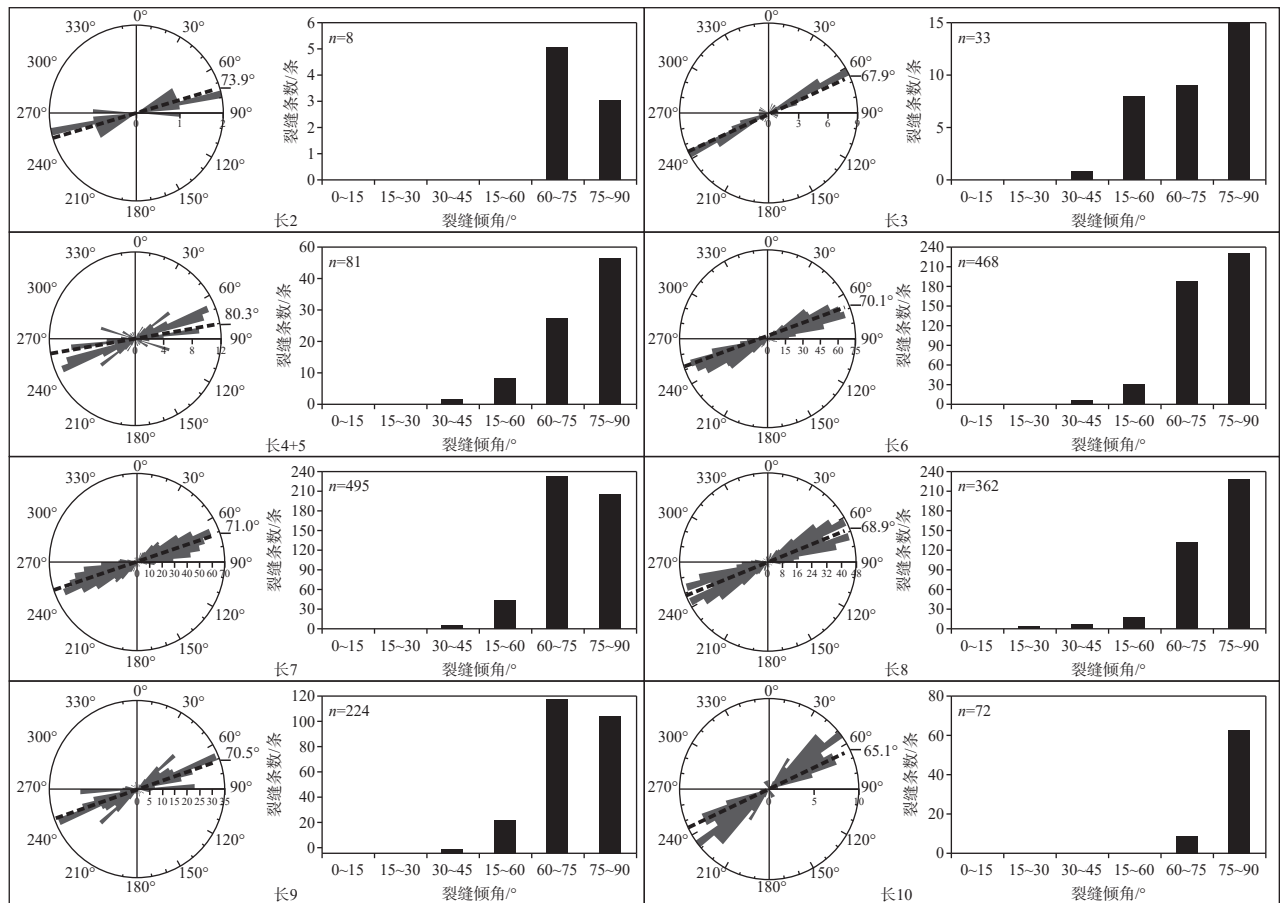


图 7 古峰庄地区延长组各油层段裂缝产状特征图  
Fig.7 Fracture occurrence characteristics of the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area





### 2.3 裂缝分布与岩层关系

前人研究表明裂缝发育程度与岩性、岩层厚度息息相关(邓虎成等, 2009; 周新桂等, 2009; 赵向原等, 2016; 樊建明等, 2016; 高金栋, 2018)。通过对研究区延长组 21 口成像测井以统计学方法, 统计分析不同岩性、岩层厚度中裂缝发育程度, 裂缝在粒度较细的岩性中大量发育裂缝, 细砂岩发育最多, 其次为泥岩, 粉砂质泥岩和泥质粉砂岩基本相当, 中砂岩最少。整体裂缝在脆性更强砂质岩类中更易形成, 占总数的 63.3% (图 9a)。因此裂缝的发育与岩石的强度、颗粒大小、成分等密切相关。裂缝发育密度受岩层厚度影响明显, 裂缝发育程度随岩层厚度增大而减小, 在岩层厚度 2 m 内, 占 93.49%, 岩层厚度 ≤1 m, 占 78.35% (图 9b), 即岩层厚度越薄, 裂缝越发育。总体岩层厚度越薄, 裂缝间距越小, 裂缝越发育。这与在野外剖面和岩心观察结果一致(图 2, 图 3), 裂缝在细砂岩和泥岩粉砂质中大量发育, 岩层厚度越薄, 裂缝越发育。

## 3 裂缝期次划分与成因

明确油气储层中构造裂缝的形成时间和期次, 对于研究油气的形成和聚集成藏十分重要(何自新, 2003; 邓虎成等, 2009; 冷济高等, 2011; 高金栋, 2018; 吴忠锐等, 2019), 本文在野外剖面、钻井岩心和成像测井资料分析表明裂缝具有多期性的基础上, 通过裂缝充填物流体包裹体分析、区域构造应力及断裂活动特征对裂缝形成期次和成因进行探讨。

### 3.1 裂缝期次划分

#### 3.1.1 裂缝充填物包裹体分析

裂缝充填物流体包裹体是研究裂缝形成时间

的有效手段, 通过裂缝充填物流体包裹体均一温度, 结合埋藏史可估算出充填物形成时间, 可推断裂缝形成时期(冷济高等, 2011; 姜琳等, 2017; 吴忠锐等, 2019)。

通过对研究区延长组 5 口井 6 件岩心样品展开裂缝充填物流体包裹体分析, 测试与油包裹体伴生的盐水包裹体均一温度数据 47 个。包裹体均一温度可分为 3 个峰值, 分别为 80°~90℃、110°~120℃、150°~160℃ (图 10a)。将均一温度峰值投到埋藏史图中(图 10b), 可知 80°~90℃ 峰值对应 145~139 Ma, 为早白垩世早期; 110°~120℃ 峰值对应 122~112 Ma, 为早白垩世晚期; 150°~160℃ 峰值为非正常地层埋藏温度, 可能记录的是早白垩世发生的异常热事件和基底热液活事件(赵文智等, 2003; 陈瑞银等, 2007; 时保宏等, 2012; 任战利等, 2017), 故忽略不计。可推测研究区裂缝活动时期为早白垩世早期和早白垩世晚期。

#### 3.1.2 断裂活动分析

研究区主体 NEE 向裂缝与 NEE 向断裂展布方向一致, 部分 NW、近 SN 向裂缝与 NW 和近 SN 断裂方向一致。笔者根据三维地震切片和地震剖面分析, 认为古峰庄地区断裂活动具有多期活动, NW 向、近 SN 向和 NEE 向断裂主要形成时期分别为晚三叠世、晚侏罗世、早白垩世以来(图 8, 表 1)。断裂的活动、产状以及性质控制着裂缝的组系、产状和展布特征(赵文智等, 2003; 何自新, 2003; 邸领军, 2006; 马润勇等, 2009; 王翠丽等, 2014; 刘永涛等, 2018; 徐兴雨等, 2019)。根据断裂与裂缝产状关系以及断裂活动活动时期, 推测 NEE 向裂缝活动时期为早白垩世以来, NW 向裂缝活动时期为晚三

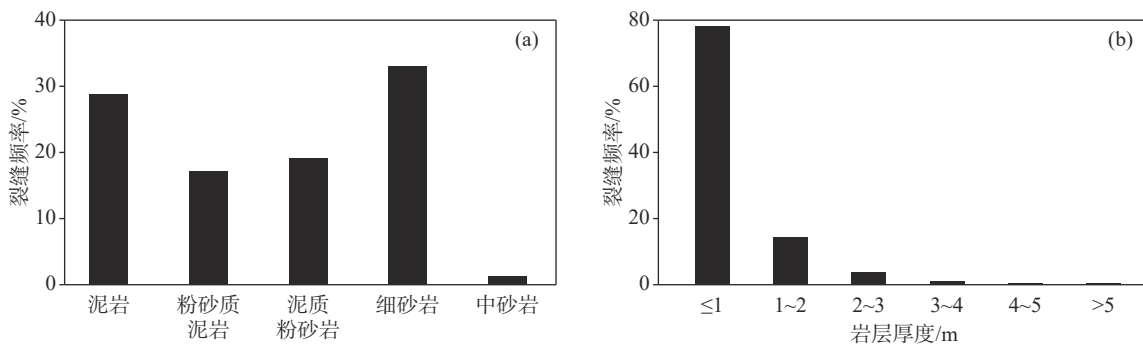


图 9 古峰庄地区延长组天然裂缝发育与岩性(a)和岩层厚度(b)关系  
Fig.9 Relationship of natural fractures and rock (a) and strata thickness (b) in the Gufengzhuang area

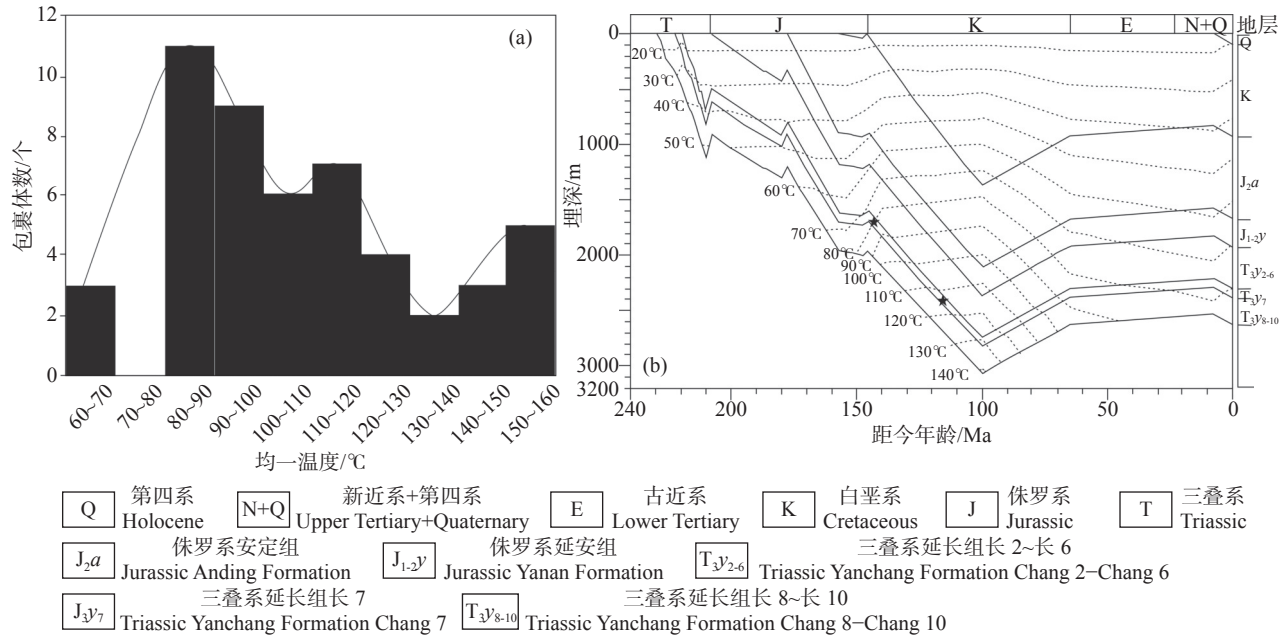


图 10 古峰庄地区延长组裂缝包裹体均一温度与埋藏史分析图

a—裂缝包裹体均一温度; b—延长组埋藏史图(据吴保祥等, 2012 修改)

Fig.10 Homogenization temperature of fracture inclusions and burial history of the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area  
a—Homogenization temperature of fracture inclusions; b—Burial history of the Yanchang Formation (modified from Wu Baoxiang et al., 2012)

表 1 古峰庄地区裂缝期次与成因机制

Table 1 Fracture stages and genetic mechanism in the Gufengzhuang area

裂缝走向	相关断裂方向	断裂性质	形成时期推测	成因机制
NW	NW雁列式断裂	张扭性	晚三叠世/印支期	扬子与华北板块碰撞产生近SN向构造挤压应力
NWW、近SN、部分NEE	SN向断裂	逆冲推覆	晚侏罗世/燕山期	拉萨地块向东北俯冲近EW向构造挤压应力
NEE、NE	NEE向断裂	张扭性	早白垩世以来/燕山期—喜马拉雅期	印度板块与欧亚板块碰撞NE—SW向构造挤压应力

叠世, 近 SN 向裂缝活动时期为晚侏罗世。

### 3.1.3 区域构造应力分析

古峰庄地区延长组裂缝均为高角度裂缝, 垂直于层面, 产状稳定, 延伸较远, 为区域水平构造应力作用形成的构造裂缝, 具有一定的剪切性质。依据前人研究(张进等, 2004; 张岳桥, 2006; 徐黎明等, 2006; 赵红格等, 2007), 盆地西部(西缘)中、新生代主要存在 3 期构造应力: 印支期为近 SN 向; 燕山期为 NW-SE 向(西北缘)和 SW-NE(西南缘), 向盆地西缘中部(研究区)应力转变为近 EW 向; 喜马拉雅期为 NE-SW 向(图 11)。裂缝的形成与中新生代以来的多期构造活动密切相关(曾联波等, 2007; 梁晓伟等, 2009; 王启宇等, 2011; 马海勇等, 2016; 高金栋, 2018)。根据不同时期构造应力场背景与裂缝关系分析, 研究区印支期构造应力形成 NW 向裂缝, 燕山期构造应力形成近 SN、NWW、NEE 向裂

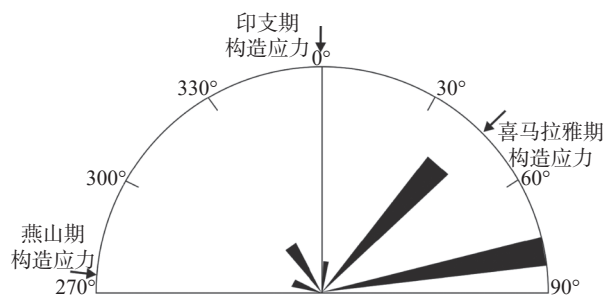


图 11 研究区不同时期构造应力方向与延长组裂缝走向关系图

Fig.11 Schematic diagram of tectonic stress and fracture strike of the Yanchang Formation in different periods in the study area

缝, 喜马拉雅期构造应力形成 NE、NEE 向裂缝。

综合以上野外观察、成像测井、包裹体分析、断裂活动特征以及构造应力分析, 结合裂缝充填的方解石脉激光原位 U-Pb 定年数据(177.8±4.8)Ma

和(12.79±0.67)Ma(课题组未发表数据), 认为古峰庄地区延长组裂缝活动具有多期性, 为印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 个期次, 其中燕山期和喜马拉雅期为主要活动时期。

### 3.2 裂缝成因探讨

裂缝成因与断裂和构造活动密切相关。印支期(中晚三叠世)特提斯洋自东向西剪刀状关闭, 扬子板块与华北板块自东向西碰撞, 形成鄂尔多斯大型内陆湖盆。造成该时期主压应力方向为近南北向, 在不同地区表现有差异, 在西缘中部地区同时受到 NW 向基底断裂重新活动的影响产生了 NW 向雁列式张剪断裂, 伴生了少量 NW 向裂缝(表 1, 图 8)。燕山期(晚侏罗世)研究区处于整体近东西向构造挤压应力背景之下(张泓, 1996; 徐黎明等, 2006; 刘亢等, 2014), 西缘逆冲推覆构造带强烈活动, 产生了近 SN 向逆冲断裂(图 8), 伴生形成部分 NWW、近 SN 向和部分 NEE 向裂缝。其形成与拉萨地块向北俯冲, 特提斯洋盆关闭有关。NEE、NE 向裂缝是研究区最主要的裂缝, 与研究区 NEE 向断裂活动相关(图 8)。NEE 向断裂具有剖面陡立、平面线形展布特征, 主要出现于下白垩统中, 推测形成时期为早白垩世以来。喜马拉雅期研究区处于 NE-SW 向构造应力, 故 NEE、NE 向裂缝形成于燕山晚期—喜马拉雅期。与印度板块和欧亚板块碰撞产生的远程效应有关。

值得注意的是, 在区域水平构造应力场作用下产生的裂缝既可能表现为两组均发育, 也可能表现为一组裂缝发育, 而另一组则不发育(张莉, 2003; 曾联波等, 2007)。同时, 晚期构造运动对早期形成的断裂/裂缝具有一定的改造作用, 对其形成期次(尤其是早期裂缝)判定造成一定的难度。而裂缝的形成还受储层岩性、岩层厚度和岩层非均质性等多种因素的影响。如研究区发育的 NEE 向裂缝, 其相关的断裂形成于早白垩世以来(表 1), 故该裂缝可能

具燕山期和喜马拉雅期两期活动, 是两期构造运动共同作用的结果。

## 4 裂缝对低渗透油藏的控制作用

### 4.1 裂缝改善低渗透储层性能

储层物性统计分析表明, 研究区长 6、长 7、长 8 储层平均孔隙度为 8.50%、7.75%、7.20%, 平均渗透率分别为  $0.175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.125 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据胡文瑞(2009)分类研究区长 6 至长 8 储层为典型的超低渗透储层(小于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。研究表明, 研究区长 6 至长 8 段裂缝密度大, 以高角度和垂直缝为主, 大部分呈未充填或半充填, 裂缝面可见油斑、油迹、油侵等不同级别的石油运移痕迹, 裂缝充填方解石脉包裹体内可见发荧光的油气包裹体, 表明裂缝为石油运移的通道。通过对长 6 至长 8 裂缝不发育段与发育段储层物性分析可见, 裂缝发育段储层孔隙度、渗透率比裂缝不发育段明显提高, 尤其是渗透率增加明显(表 2)。以 Y66 井长 6 段为例(图 12), 2200~2260 m 砂岩夹泥岩和砂岩段中整体发育裂缝, 裂缝以未充填的高角度和垂直裂缝为主。孔隙度分布于 5.80%~14.76%, 平均为 10.22%, 渗透率分布于  $0.06 \times 10^{-3} \sim 0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均  $0.185 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属于低渗透储层。2234~2235 m 井段裂缝不发育, 平均孔隙度和渗透率分别为 9.13%、 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 而与之相邻的 2237.5~2238.5 m 井段裂缝发育, 密度为 0.5 条/m, 平均孔隙度和渗透率分别为 13.40%、 $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 在该位置测试求产获得 23.89 t/d 高产工业油流。可见裂缝的大量发育改善了低渗透储层性能, 促进油气的运聚成藏, 并影响着油井的产量(表 2)。

### 4.2 裂缝活动促成了低渗透油藏成藏

研究区延长组长 7 段为良好的油源岩, 长 6 至长 8 低渗透储层与烃源岩层段呈大面积接触, 裂缝

表 2 古峰庄地区裂缝与储层物性、单井产量关系

井位	层位	无裂缝发育段		裂缝发育段		产量/(t/d)
		平均孔隙度/%	平均渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	平均孔隙度/%	平均渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	
Y66	长6	9.13	0.11	10.83	0.43	23.89
Y226	长6	9.32	0.13	10.95	0.21	5.10
Y65	长6	5.48	0.04	9.86	0.14	6.46
	长7	4.42	0.03	10.09	0.15	
Y155	长8	10.07	0.37	15.10	0.80	4.42

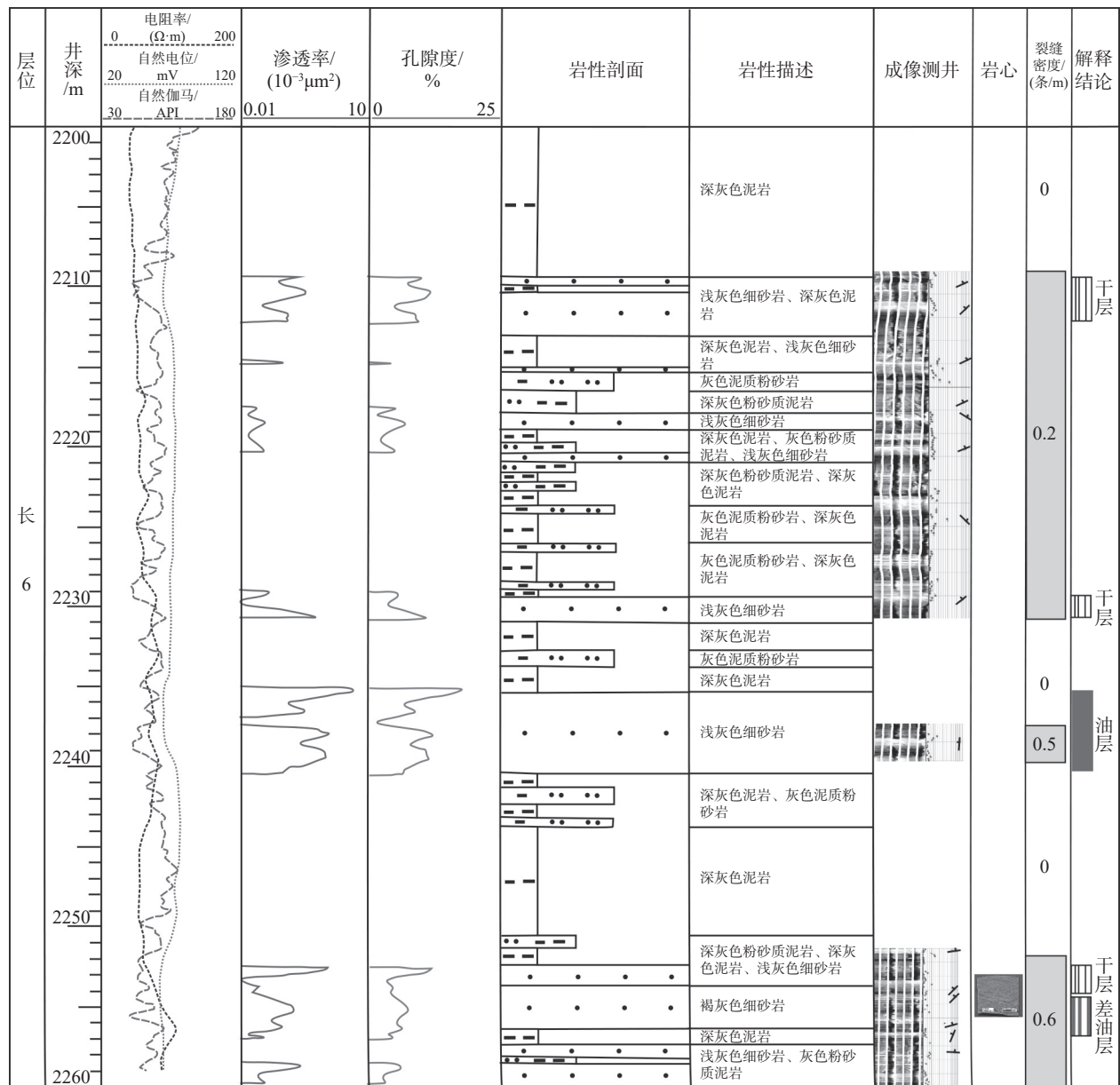


图12 古峰庄地区Y66井长6段裂缝综合评价图

Fig.12 Comprehensive evaluation of fractures in the Chang 6 member of well Y66 in the Gufengzhuang area

发育井皆为油井或含油层显示井,裂缝对低渗透储层成藏具有重要作用(图8)。印支期的裂缝对于延长组储层性能具有一定的改善作用。燕山期是裂缝的主要形成期,而该时期恰好为长7段烃源岩达到最大埋深后大规模排烃、运移-成藏期(李荣西等,2006;李元昊等,2009;吴保祥等,2012;付金华等,2013;屈雪峰等,2017;任战利等,2017),长7、长6和长8段垂直裂缝和高角度裂缝大量发育,有利于长7段生成的油气沿着裂缝/断裂向上部(长

6)、下部(长8)低渗透储层中运移、聚集,并在合适位置成藏。尤其是长7内部裂缝的发育,使储层性能得到改善,具有近源的优势,易于充注成藏。喜马拉雅期裂缝对已形成的油藏进行后期调整或破坏,使得油气沿着裂缝/断裂进一步向上逸散,或在远离油源岩的延长组上部层位或延安组聚集成藏。多期裂缝的活动促成了研究区多层系油藏的形成。

裂缝发育特征和活动时期对延长组低渗透油

藏勘探具有重要作用,同时对油藏的开发部署、产能及后期油田开发注水等提供重要的科学依据。由于裂缝形成受构造应力、构造位置、岩石性质等多种因素影响,且后期活动的裂缝对早期裂缝具有一定的改造作用,使得裂缝特征和时期研究具有一定的难度,尚需要更多的方法和手段进行约束,以更好地指导低渗透油藏的勘探和开发。

## 5 结 论

(1)古峰庄地区三叠系延长组各段天然裂缝发育,以长 7 段最发育,其次为长 8、长 6 段;裂缝走向以 NEE 向为主;以高角度和垂直缝为主,裂缝面较平直,可见明显油气运移痕迹。

(2)古峰庄地区三叠系延长组天然裂缝的发育与岩性、层厚和断裂活动等密切相关,在 NEE 向断裂附近裂缝最发育。裂缝充填物包裹体、区域构造应力、断裂活动等综合分析表明,裂缝活动具有多期性,主要为燕山中晚期和喜马拉雅期。

(3)延长组长 7、长 6、长 8 天然裂缝的大量发育改善了低渗透储层的孔渗能力。裂缝主要活动期与石油大规模排烃、运移—成藏期吻合,为低渗透油储层中油气运移、聚集和成藏提供了良好条件。

## References

- Bai Yubin, Luo Jinglan, Wang Shaofei, Yong Yang, Tang Leping, Fu Xiaoyan, Zheng Hui. 2013. The distribution of Chang-8 tight sandstone oil reservoir Yanchang Formation in Wubao area, central-south of Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 40(4): 1159-1168 (in Chinese with English abstract).
- Bai Y B, Zhao J Z, Zhao D L, Zhang H, Fu Y. 2021. Pore structure and its control on reservoir quality in tight sandstones: A case study of the Chang 6 member of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Jingbian Oilfield in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11: 171-189.
- Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun. 2007. Thermal anomaly and thermal evolution of source rocks in Mesozoic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, (6): 658-663 (in Chinese with English abstract).
- Dang B, Zhao H, Qu M M, Wang T, Mi W W, Guo X D, Fan J T, Liu P F. 2018. Distribution characteristics, genesis analyses, and research significance of Triassic regional structural fractures in the Ordos Basin, central China[J]. *Geological Journal*, (S1): 212-224.
- Di Lingjun. 2006. Controlling of petrophysical fractures on extra-low permeability oil and gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, (6): 667-670 (in Chinese with English abstract).
- Deng Hucheng, Zhou Wen, Jiang Wenli, Liu Yan, Liang Feng. 2009. Genetic mechanism and development periods of fracture in Yanchang and Yan'an Formation of Western Mahuangshan Block in Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 811-817 (in Chinese with English abstract).
- Deng Hucheng, Zhou Wen, Peng Jun, Wu Yongping, Jiang Wenli. 2010. Relationship between fractures and hydrocarbon accumulation of Mahuangshan area in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 28(1): 81-85 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiuqin, Yao Jingli, Hu Xifeng, Li Shixiang, Liu Xin. 2011. Characteristics and geological significance of hydrodynamic system on ultra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 41(6): 1044-1050 (in Chinese with English abstract).
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Yao Jingli, Ye Xiaochuang, Wu Weitao, Bai Yubin, Deng Xiuqin, Sun Bo. 2016. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(3): 341-353 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jianming, Qu Xuefeng, Chong Wang, Lei Qihong, Cheng Liangbing, Yang Ziqing. 2016. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(5): 740-748 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua, Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, Zhang Xuefeng, Cheng Dangqing. 2013. A study of the accumulation periods of low permeability reservoir of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 125-131 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jindong. 2018. Identification and Modeling of Tight Sandstone Natural Fractures in Chang 7 Section of Triassic Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- He Zixin. 2003. Evolution of Ordos Basin and Oil and Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Hu Wenrui. 2009. Theory of Low-permeability Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Hui Xiao, Zhao Yande, Shao Xiaozhou, Zhang Wenxuan, Cheng Fangxing, Luo Anxiang. 2019. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 24(2): 14-22 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Lin, Qiu Zhen, Guo Yusen, Wu Chaofan, Wu Zhijie. 2017. The analysis of secondary minerals and fracture formation time in Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 52(3): 915-930 (in Chinese with English abstract).
- Ju Wei, You Yuan, Feng Shengbin, Xu Haoran, Zhang Xiaoli, Wang Shengyu. 2020. Characteristics and genesis of bedding-parallel fractures in tight sandstone reservoirs of Chang 7 oil layer, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 596-605 (in Chinese with English abstract).
- Leng Jigao, Li Shubing, Yang Changqing. 2011. Determination of the

- tines of gas accumulation in the Xujiache Formation of Xiaoquan-Fenggu structural belt in the Western Sichan depression through fluid inclusion analysis[J]. *Natural Gas Industry*, 31(8): 38-42,131 (in Chinese with English abstract).
- Li Rongxi, Xi Shengli, Di Lingjun. 2006. Oil/gas reservoiring phases determined through petrographic analysis of hydrocarbon inclusions in reservoirs: Taking Longdong oilfield, Ordos basin, as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, (2): 194-199, 217 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuanhao, Liu Chiyang, Wang Xiujuan, Du Yuguo. 2009. Episodic migration and accumulation of hydrocarbon in lower Yanchang Formation of the northwestern Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 61-67 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xiaowei, Han Yonglin, Wang Haihong, Wang Chengyu, Niu Xiaobing, Xin Honggang. 2009. Fracture characteristics and geological significance of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 21(2): 49-53 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kang, Cao Daiyong, Xu Hao, Gao Kefei, Ma Zhikai. 2014. Paleotectonic stress field evolutionary analysis in west margin of Ordos Coal Basin[J]. *Coal Geology of China*, 26(8): 87-90(in Chinese with English abstract).
- Liu Xingjun, Yang Shuangding, Xie Gang, Liu Kebo, Li Xingwen, Wang Zhefeng. 2014. The study of relationship between fracture characteristic and yield of Chang 8 section in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 21(6): 57-60, 114-115(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongtao, Liu Chiyang, Zhao Junfeng, Huang Lei, Song Xuyang. 2018. Forming mechanism of small-scale faults and their control for the reservoir formation in the middle of western margin of the Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 53(3): 922-940 (in Chinese with English abstract).
- Luo Bin, Deng Hucheng, Huang Tingting, Peng Xianfeng, Bi Yu, Zhang Xiaojun, Ou Haomiao, Zou Yunting. 2017. Study on the main controlling factors and development models of Mesozoic natural fractures in the Jinghe oilfield, South of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 44(1): 57-66 (in Chinese with English abstract).
- Luo Guibin. 2008. Evaluation of Fracture Reservoir for Yanchang Formation in Mahuang Mountain of the West Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Ma Haiyong, Zhou Lifa, Zhang Xuefeng, Han Tianyou. 2016. Analysis of factors affecting fractures of Chang 8 subsection based on Dingbian-Wuqi area of Shaanxi Province[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 44(2): 106-110 (in Chinese with English abstract).
- Ma Runyong, Zhu Haoping, Zhang Daofa, Pan Aifang. 2009. Basement faults and their recent activity in Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 31(4): 400-408 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xuefeng, Wen Deshun, Zhang Long, Cui Zhengfeng, Zhang Handan, Ma Jing. 2017. Accumulation process of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation Ordos Basin: A case from Gufengzhuang-Mahuangshan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 383-392 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xuefeng, Zhou Xiaofeng, Liu Lili, Ding Li. 2018. Densification process of Chang 8<sub>2</sub> ultra-low permeability sandstone, Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 29(3): 337-348 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Yu Qiang, Cui Junping, Qi Kai, Chen Zhanjun, Cao Zhanpeng, Yang Peng. 2017. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 137-148 (in Chinese with English abstract).
- Shi Baohong, Zhang Yan, Zhang Lei, Yang Yajuan, Li Hui. 2012. Hydrocarbon accumulation dating by fluid inclusion characteristics in Chang7 tight sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(6): 599-603 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cuili, Zhou Wen, Li Hongbo, Deng Hucheng, Liu Yan. 2014. Characteristics and distribution of fractures in Yanchang Formation in Zhenjing area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 41(5): 596-603 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiyu, Zheng Rongcai, Liang Xiaowei, Xin Honggang, Wang Changyong. 2011. Characteristics and distribution of multiphase fractures in Yanchang Formation of Zhenjing block in Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 38(2): 220-228 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuncheng. 1992. *Fractured Tight Oil and Gas Reservoir* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Wu Baoxiang, He Jinxian, Zhang Xiaoli, Xu Li, Xia Jia, Duan Yi. 2012. Analysis of burial evolution of stratum and oil-gas reservoirs formation in Ordos basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 36(6): 8-13,48,5-6 (in Chinese with English abstract).
- Wu Deming, Man Hongxia, Xia Changliang, Tong Qingjia, Liu Hongjiu, Wang Yongming. 2018. Prestack depth migration on Gufengzhuang seismic data in Ordos Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 53(S1): 117-123, 11-12 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weitao, Deng Jing, Zhao Jingzhou, Sun Bo, Guo Hanqing, Deng Xiuqin, Er Chuang, Bai Yubin. 2016. Accumulation conditions and models of tight oil reservoirs in Chang 7 of Huaqing area, the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(6): 874-881 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhongrui, He Sheng, He Xipeng, Zhai Gangyi, Huang Yahao, Zhao Wen, Han Yuanjia, Yang Rui. 2019. Characteristics of fluid inclusions in fracture calcite veins and implications of Upper Permian Dalong Formation shale at the Lianyuan Depression[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(4): 70-81 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Chengyu, Yin Wei, Zhang Ying, Xu Shilin, Yang Yu, Liu Zhenfeng. 2015. Petroleum accumulation systems and oil enrichment patterns of Yanchang Formation in Zhenjing area, southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(3): 347-353 (in Chinese with English abstract).

- Xu Liming, Zhou Lifa, Zhang Yikai, Dang Ben. 2006. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, (4): 455-462 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingyu, Wang Weifeng, Chen Mou. 2019. Characteristics of faults and their significance in hydrocarbon accumulation in Ordos basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(4): 830-841 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, Feng Shengbin, You Yuan. 2017. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- Yang Weiwei, Liu Guangdi, Liu Xianyang, Feng Yuan, Du Yuguo, Cheng Dangqing. 2013. The accumulation mechanism and accumulation models of oil in low permeability sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 132-139 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Chengen, Wang Zhengguo, Zhao Jiyong, Wang Yongkang. 2007. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Acta Geological Sinica*, (2): 174-180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong. 1996. Mesozoic and Cenozoic Palaeotectono-stress Field of Ordos Basin[J]. *Journal Geology & Mineral Resources North China*, 11(1): 87-92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. 2004. Tectonic characteristics of the Western Ordos thrust-fold belt and the causes for its north south segmentation[J]. *Acta Geological Sinica*, (5): 600-611 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li. 2003. Characteristics of reservoir fracture and the analysis of stress field in Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica) and Technology Information*, (2): 21-24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linyan, Fan Kun, Liu Jindong, Zhou Xingui, Wang Chunyu, Yuan Yangsen. 2006. Quantitative prediction of distribution of tectonic fractures in the Yanchang Formation in the Zhenyuan-Jingchuan area, Ordos Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, (4): 476-484 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. 2006. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. *Geology in China*, (1): 28-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Wang Feng, Yin Yan. 2007. Tectonic attribute of the western Ordos basin during the Late Triassic[J]. *Geology in China*, (3): 384-391 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, Er Chuang. 2012. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 33(6): 811-827 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, Dong Dazhong. 2003. Controlling role of basement fault in Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, (5): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xuanguan, Zeng Lianbo, Zukewei, Hu Xiangyang, Jiao Jun, Zhu Lifeng, Shi Jinxiong. 2016. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(1): 62-71 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xingui, Zhang Linyan, Qu Xuefeng, Li Liang, Huang Chenjun. 2009. Characteristics and quantitative prediction of distribution laws of tectonic fractures of low-permeability reservoirs in Yanhewan area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30(2): 195-200 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白玉彬, 罗静兰, 王少飞, 杨勇, 唐乐平, 付晓燕, 郑卉. 2013. 鄂尔多斯盆地吴堡地区延长组长 8 致密砂岩油藏成藏主控因素[J]. *中国地质*, 40(4): 1159-1168.
- 陈瑞银, 罗晓容, 赵文智, 王红军. 2007. 鄂尔多斯盆地中生代热异常及烃源岩热演化特征[J]. *石油勘探与开发*, (6): 658-663.
- 邸领军. 2006. 鄂尔多斯盆地储集层物性断裂对超低渗油气藏的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, (6): 667-670.
- 邓虎成, 周文, 姜文利, 刘岩, 梁峰. 2009. 鄂尔多斯盆地麻黄山西区块延长、延安组裂缝成因及期次[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(5): 811-817.
- 邓虎成, 周文, 彭军, 吴永平, 姜文利. 2010. 鄂尔多斯麻黄山地区裂缝与油气成藏关系[J]. *新疆地质*, 28(1): 81-85.
- 邓秀芹, 姚涪利, 胡喜锋, 李士祥, 刘鑫. 2011. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透岩性油藏成藏流体动力系统特征及其意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 41(6): 1044-1050.
- 耳闯, 赵靖舟, 姚涪利, 叶小闯, 吴涛伟, 白玉彬, 邓秀芹, 孙勃. 2016. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组页岩-致密砂岩储层孔隙特征[J]. *石油与天然气地质*, 37(3): 341-353.
- 樊建明, 屈雪峰, 王冲, 雷启鸿, 成良丙, 杨子清. 2016. 鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. *石油勘探与开发*, 43(5): 740-748.
- 付金华, 柳广弟, 杨伟伟, 冯渊, 张雪峰, 程党性. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透油藏成藏期次研究[J]. *地学前缘*, 20(2): 125-131.
- 高金栋. 2018. 鄂尔多斯盆地姬塬油田三叠系延长组长 7 油层组致密砂岩天然裂缝识别与建模[D]. 西安: 西北大学.
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 胡文瑞. 2009. 低渗透油气田概论[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 张文选, 程党性, 罗安湘. 2019. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 24(2): 14-22.
- 姜琳, 邱振, 郭玉森, 吴超凡, 吴志杰. 2017. 鄂尔多斯盆地延长组次生矿物与裂缝形成时限分析[J]. *地质科学*, 52(3): 915-930.
- 鞠玮, 尤源, 冯胜斌, 徐浩然, 张晓丽, 王胜宇. 2020. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组致密砂岩储层层理缝特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 41(3): 596-605.
- 冷济高, 李书兵, 杨长清. 2011. 利用流体包裹体确定川西坳陷孝泉—丰谷构造带须家河组天然气成藏期[J]. *天然气工业*, 31(8): 38-42, 131.
- 李荣西, 席胜利, 邸领军. 2006. 用储层油气包裹体岩相学确定油气

- 成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例[J]. 石油与天然气地质, (2): 194-199, 217.
- 李元昊, 刘池洋, 王秀娟, 独育国. 2009. 鄂尔多斯盆地西北部延长组下部幕式成藏特征[J]. 石油学报, 30(1): 61-67.
- 梁晓伟, 韩永林, 王海红, 王成玉, 牛小兵, 辛红刚. 2009. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组裂缝特征及其地质意义[J]. 岩性油气藏, 21(2): 49-53.
- 刘亢, 曹代勇, 徐浩, 高科飞, 马志凯. 2014. 鄂尔多斯煤盆地西缘古构造应力场演化分析[J]. 中国煤炭地质, 26(8): 87-90.
- 刘行军, 杨双定, 谢刚, 刘克波, 李兴文, 王哲峰. 2014. 鄂尔多斯盆地合水地区长 8 段裂缝发育特征及其对产油量的影响[J]. 油气地质与采收率, 21(6): 57-60, 114-115.
- 刘永涛, 刘池洋, 赵俊峰, 黄雷, 宋旭阳. 2018. 鄂尔多斯盆地西缘中部微小断层的成因机制与控藏特征[J]. 地质科学, 53(3): 922-940.
- 罗斌, 邓虎成, 黄婷婷, 彭先锋, 毕钰, 张小菊, 欧浩森, 邹响廷. 2017. 泾河地区中生界致密油藏天然裂缝发育主控因素及模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(1): 57-66.
- 罗桂滨. 2008. 鄂尔多斯西部麻黄山延长组储层裂缝评价[D]. 成都: 成都理工大学.
- 马海勇, 周立发, 张雪峰, 韩天佑. 2016. 陕西省定边—吴起地区延长组长 8 地层裂缝形成因素分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 44(2): 106-110.
- 马润勇, 朱浩平, 张道法, 潘爱芳. 2009. 鄂尔多斯盆地基底断裂及其现代活动性[J]. 地球科学与环境学报, 31(4): 400-408.
- 屈雪峰, 温德顺, 张龙, 崔争锋, 张瀚丹, 马静. 2017. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透油藏形成过程分析——以古峰庄—麻黄山地区为例[J]. 沉积学报, 35(2): 383-392.
- 屈雪峰, 周晓峰, 刘丽丽, 丁黎. 2018. 鄂尔多斯盆地古峰庄—麻黄山地区长 8<sub>2</sub> 低渗透砂岩致密化过程分析[J]. 天然气地球科学, 29(3): 337-348.
- 任战利, 于强, 崔军平, 祁凯, 陈占军, 曹展鹏, 杨鹏. 2017. 鄂尔多斯盆地地热演化史及其对油气的控制作用[J]. 地学前缘, 24(3): 137-148.
- 时保宏, 张艳, 张雷, 杨亚娟, 李慧. 2012. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 致密储层流体包裹体特征与成藏期次[J]. 石油实验地质, 34(6): 599-603.
- 王翠丽, 周文, 李红波, 邓虎成, 刘岩. 2014. 镇泾地区延长组多期次裂缝发育特征及分布[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(5): 596-603.
- 王启宇, 郑荣才, 梁晓伟, 辛红刚, 王昌勇. 2011. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组裂缝特征及成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(2): 220-228.
- 王允诚. 1992. 裂缝性致密油气储集层[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴保祥, 何金先, 张晓丽, 徐丽, 夏嘉, 段毅. 2012. 鄂尔多斯盆地地层埋藏演化与油气成藏分析[J]. 东北石油大学学报, 36(6): 8-13, 48, 5-6.
- 吴德明, 满红霞, 夏常亮, 童庆佳, 刘红久, 王永明. 2018. 叠前深度偏移在鄂尔多斯盆地古峰庄地区的应用[J]. 石油地球物理勘探, 53(S1): 117-123, 11-12.
- 吴伟涛, 邓静, 赵靖舟, 孙勃, 郭汉卿, 邓秀芹, 耳闯, 白玉彬. 2016. 鄂尔多斯盆地华庆地区长 7 油层组致密油成藏条件与成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 37(6): 874-881.
- 吴忠锐, 何生, 何希鹏, 翟刚毅, 黄亚浩, 赵文, 韩元佳, 杨锐. 2019. 涟源凹陷上二叠统大隆组泥页岩裂缝方解石脉体流体包裹体特征及其启示[J]. 地质科技情报, 38(4): 70-81.
- 肖承钰, 尹伟, 张颖, 徐士林, 杨渔, 刘振峰. 2015. 鄂尔多斯镇泾地区延长组成藏体系与油气富集模式[J]. 石油实验地质, 37(3): 347-353.
- 徐黎明, 周立发, 张义楷, 党犇. 2006. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, (4): 455-462.
- 徐兴雨, 王伟锋, 陈谋. 2019. 鄂尔多斯盆地断裂特征及其石油地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 48(4): 830-841.
- 杨华, 梁晓伟, 牛小兵, 冯胜斌, 尤源. 2017. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段为例[J]. 石油勘探与开发, 44(1): 12-20.
- 杨伟伟, 柳广弟, 刘显阳, 冯渊, 独育国, 程党性. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透砂岩油藏成藏机理与成藏模式[J]. 地学前缘, 20(2): 132-139.
- 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 王正国, 赵继勇, 王永康. 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, (2): 174-180.
- 张泓. 1996. 鄂尔多斯盆地中生代构造应力场[J]. 华北地质矿产杂志, 11(1): 87-92.
- 张进, 马宗晋, 任文军. 2004. 鄂尔多斯西缘逆冲褶皱带构造特征及其南北差异的形成机制[J]. 地质学报, (5): 600-611.
- 张莉. 2003. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析[J]. 地质科技情报, (2): 21-24.
- 张林炎, 范昆, 刘进东, 周新桂, 王春宇, 袁杨森. 2006. 鄂尔多斯盆地镇原—泾川地区三叠系延长组构造裂缝分布定量预测[J]. 地质力学学报, (4): 476-484.
- 张岳桥, 廖昌珍. 2006. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, (1): 28-40.
- 赵红格, 刘池洋, 王建强, 王锋, 银燕. 2007. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世构造属性探讨[J]. 中国地质, (3): 384-391.
- 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 耳闯. 2012. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 33(6): 811-827.
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 董大忠. 2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用[J]. 石油勘探与开发, (5): 1-5.
- 赵向原, 曾联波, 祖科威, 胡向阳, 焦军, 朱利锋, 史今雄. 2016. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 37(1): 62-71.
- 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 李亮, 黄臣军. 2009. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. 石油学报, 30(2): 195-200.